

# Estudio de la distribución de hidrógeno en una contención PWR con códigos CFD

*Gonzalo Jiménez / DIE, Universidad Politécnica de Madrid  
Rubén Matías Martínez / DIE, Universidad Politécnica de Madrid  
Kevin Fernández / DIE, Universidad Politécnica de Madrid  
Daniel Justo Morato / DIE, Universidad Politécnica de Madrid  
Rafael Bocanegra Melián/ DIN, Universidad Politécnica de Madrid  
Luis Mena / DEC, Universidad Politécnica de Madrid  
César Queral / DEC, Universidad Politécnica de Madrid*

## 1. Introducción

Durante el desarrollo de un accidente severo en un reactor PWR, se pueden generar grandes cantidades de hidrógeno por la oxidación de los metales presentes en el núcleo, principalmente el zirconio de las vainas del combustible. Este hidrógeno, junto con vapor y otros gases, puede ser liberado a la atmósfera de la contención por una fuga o rotura en el circuito primario y alcanzar condiciones en las que pueda darse combustión. La combustión provoca cargas térmicas y de presión que pueden dañar los sistemas de seguridad y la integridad del edificio de contención, última barrera de confinamiento de los materiales radiactivos. La principal condición que define las características de la combustión es la concentración de especies, por lo que el conocimiento detallado de la distribución de hidrógeno resulta muy importante para predecir correctamente los posibles daños en la contención en el caso de que se produjera combustión.

El riesgo asociado al hidrógeno en una central nuclear puede ser definido como el riesgo de que el hidrógeno entre en combustión en el edificio de contención, lo que puede dañar su integridad debido a cargas de presión y temperatura (1). En una planta nuclear, el edificio de la contención es la última barrera que evita la liberación de material radiactivo al exterior, por lo que las consecuencias de un accidente severo dependen de la capacidad de la contención para retenerlo (2). El conocimiento de las cargas de presión y temperatura en el edificio, junto con la necesaria comprensión de todos los procesos termohidráulicos asociados al hidrógeno en contención, permiten disminuir el riesgo en una instalación a causa de un accidente.

La generación de hidrógeno se puede dividir en tres fases según el desarrollo del accidente: oxidación in-vessel, principalmente del zirconio de las vainas de combustible; oxidación durante la relocalización en la fase in-vessel tardía de Zr y U; oxidación ex-vessel del material metálico no oxidado previamente durante la interacción corium hormigón (Molten Core Concrete Interaction).

El transporte y la mezcla de hidrógeno dentro de la contención son críticos para determinar el momento en que se producirá la combustión y las características de ésta (2). La liberación de hidrógeno a la contención se producirá por una o varias roturas en el sistema primario, que pueden ser de diferentes tamaños y encontrarse en diferentes zonas del circuito de refrigeración en función de la secuencia accidental y de la configuración del accidente.

El jet de hidrógeno y vapor se mezcla con la atmósfera intercambiando cantidad de movimiento y masa. El análisis de la distribución de especies en contenciones tipo PWR en condiciones de accidente es muy complejo, dado el gran número de variables relacionadas entre sí que hay que tener en consideración (3) y de mecanismos involucrados. Ejemplos de estos mecanismos son los flujos de gas, causados por fuerzas inerciales o fuerzas de flotación, la difusión molecular, la transmisión de calor entre las estructuras de la contención (tuberías y paredes) y la atmósfera, la condensación de vapor en las paredes o actuación de salvaguardias... etc.

Según el desarrollo del accidente se pueden dar tres situaciones: atmósfera homogénea, acumulación en compartimentos intermedios y estratificación. Fenómenos como la liberación continua de gas, sobre todo de vapor, la transmisión de calor, la condensación y el calentamiento de la atmósfera por productos de fisión volátiles pueden favorecer la homogeneización o, por el contrario, la acumulación en ciertas zonas preferentes de la contención (4).

En la UPM se ha participado activamente en la simulación de casos de accidente severo en reactores PWR desde múltiples perspectivas, desde la evaluación del riesgo de combustión, (4), hasta el análisis de las actuaciones del operador en el desarrollo del accidente. En este proyecto se ha realizado un análisis de las capacidades de los códigos CFD ANSYS Fluent 15.0 y GOTHIC 8.0 para estudiar la distribución del hidrógeno en contención y de predecir correctamente algunos de los fenómenos relevantes que puedan darse. Se ha estudiado liberación de hidrógeno en casos de SBO y durante la fase ex-vessel en una contención PWR. También se ha estudiado el caso de rotura de estratificación como parte de un benchmark de la OECD/NEA realizado en la instalación PANDA del Paul Scherrer Institute (PSI).

## 2. Modelo PWR-UPM

El modelo PWR-UPM se trata de una aproximación a una contención PWR-W creada para su uso en simulaciones con GOTHIC y ANSYS Fluent, (Fig. 1). En este modelo se tienen modelados todos los grandes componentes, como los generadores de vapor o la vasija, así como todos los muros del edificio de contención. El modelo está actualmente siendo testado con las referencias de test experimentales sobre la fenomenología de la contención en accidente.

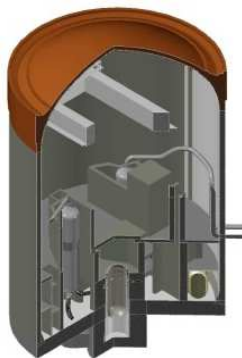


Fig. 1: Modelo PWR-UPM

En Fig. 2 y Fig. 3 se pueden ver los mallados empleados en GOTHIC y Fluent para las simulaciones.

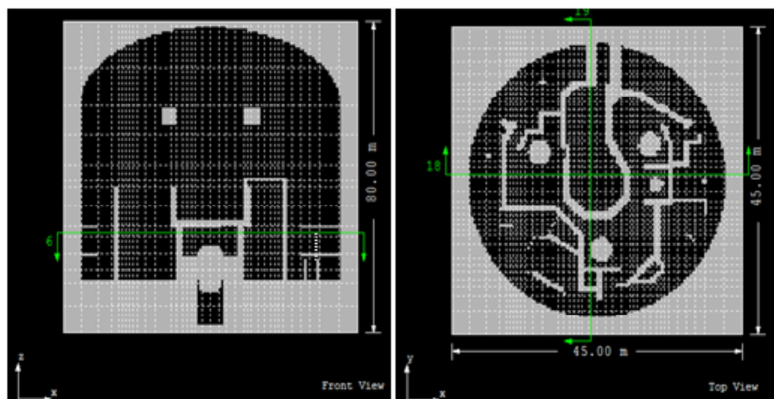


Fig. 2: Mallado con GOTHIC

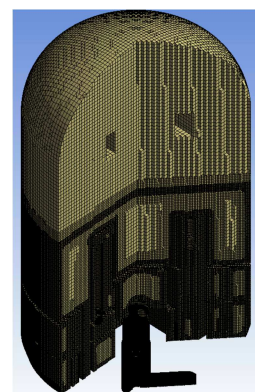


Fig. 3: Mallado con ANSYS Fluent

### 3. Distribución de hidrógeno en una contención PWR durante la fase de liberación

A partir de la creación del modelo PWR-UPM se están realizando simulaciones de liberación de hidrógeno en accidentes severos como las mostradas en Fig. 4. Para ello, se han realizado liberaciones a la contención por fugas en el circuito primario (SBO) y liberación desde la cavidad del reactor por generación de hidrógeno ex-vessel. Ambos casos están siendo analizados como una etapa previa al estudio del impacto de sistemas activos y pasivos sobre el riesgo de combustión de hidrogeno en este tipo de contenciones.

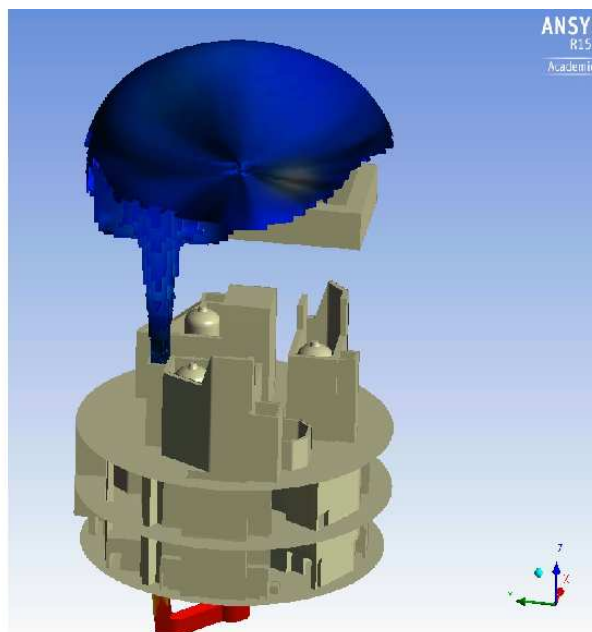
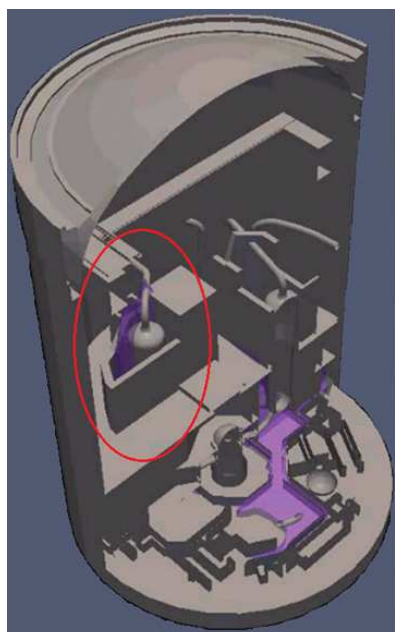


Fig. 4: Simulación de SBO con GOTHIC (izq.) y simulación fase ex-vessel con ANSYS Fluent (dcha.)

## **4. Rotura de estratificación**

La presencia de una estratificación estable de gas ligero en la contención durante el transcurso de un accidente severo es un fenómeno importante en el estudio de la seguridad nuclear relacionado con los riesgos del hidrógeno (5). La concentración dentro de la estratificación puede alcanzar límites de inflamabilidad, con el consiguiente riesgo de combustión. La rotura de la estratificación es uno de las posibles situaciones que pueden darse en un accidente severo, en el que la estratificación creada en una primera fase del accidente pueda verse afectada en una fase posterior del accidente por la aparición de fuentes y sumideros de masa y calor, como nuevas liberaciones de vapor o hidrógeno, o por la operación de los equipos de seguridad.

El test que se ha simulado con los códigos GOTHIC y ANSYS Fluent corresponde a un benchmark internacional de la OECD/NEA realizado en la instalación PANDA en el que ha participado el Departamento de Ingeniería Energética de la UPM que simula un escenario de estratificación en una contención.

### **4.1 Descripción del test**

La instalación PANDA es una instalación experimental multi-compartmentada de larga escala para test termohidráulicos de centrales nucleares. Para el test de este benchmark, se ha empleado una de las seis vasijas que componen la instalación. La inyección del gas según las especificaciones se realiza desde una tubería cuyo punto de salida está situado de forma que la salida del flujo se produzca verticalmente y suficientemente alejada de las paredes para evitar posibles efectos de la pared a la salida del tubo. La ventilación de la mezcla de gases se realiza mediante un embudo situado en el eje de la vasija unido a un tubo flexible por el que sale el gas al exterior de la vasija (6).

El test realizado consiste en el estudio del comportamiento de una estratificación estable rica en helio ante la inyección de un flujo vertical de aire/helio de temperatura creciente hasta obtener una atmósfera homogénea.

### **4.2 Resultados de los casos pre-test en GOTHIC y ANSYS Fluent**

Dadas las características del benchmark (blind), las simulaciones se realizaron antes de conocer los resultados experimentales. Una vez conocidos los datos del experimento, se observa que se ha conseguido reproducir el proceso de erosión pero con grandes diferencias en la velocidad a la que se va erosionando la capa estratificada con respecto a los resultados experimentales para ambos códigos. Como aplicación a este caso, se están realizando casos de rotura de estratificación de H<sub>2</sub> en ANSYS Fluent y GOTHIC para la contención PWR-UPM, Fig. 6.

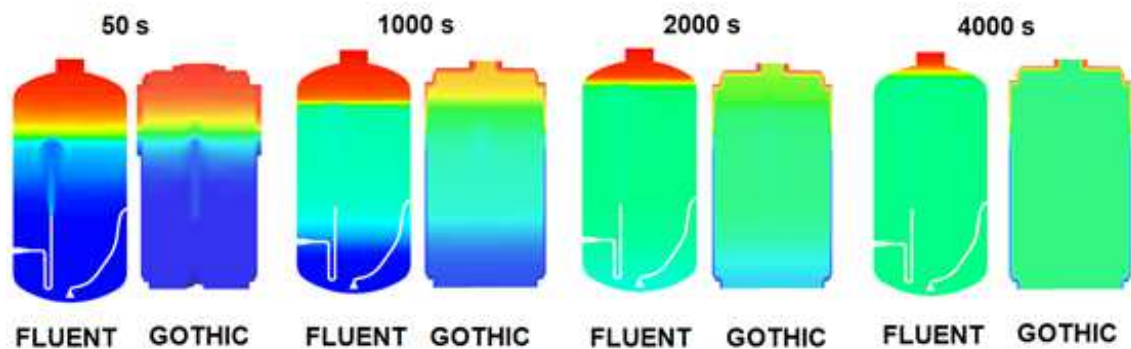


Fig. 5: Desarrollo simulaciones

## 5. Conclusiones

El empleo de códigos de simulación numérica en la investigación de accidentes con presencia de hidrógeno en accidentes nucleares ha sido objeto de una intensa labor de investigación y validación durante las última décadas, como en benchmarks como los realizados por la OECD/NEA en la instalación PANDA, (3) y (6). Su uso en la investigación de estos accidentes presenta aún bastantes retos, pero puede llevar a una mejor comprensión del comportamiento del hidrógeno en accidentes nucleares.

En este trabajo, se ha estudiado la adecuación de uso de este tipo de códigos para la simulación de casos de liberación de  $H_2$  y de escenarios de estratificación. En trabajos futuros, mediante el análisis de más escenarios de liberación de hidrógeno, se estudiará con más detalle los riesgos asociados a las concentraciones locales de hidrógeno así como el impacto del uso de sistemas activos y pasivos.

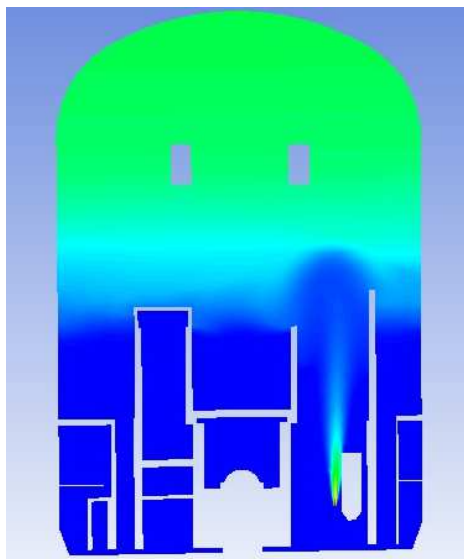


Fig. 6: Jet impactando con una estratificación ya creada en el modelo de PWR-UPM en ANSYS Fluent.

## Referencias

1. *Hydrogen hazard and mitigation analysis in PWR containment*. **Sahin, S and Sarwar, M. S.** s.l. : Annals of Nuclear Energy 58, 132-140, 2013, pp. Annals of Nuclear Energy 58, 132-140.
2. *Prevention and mitigation measures to ensure containment integrity*. **De Boeck, B.** 2001, pp. Nuclear Engineering and Design 209, 147-154.
3. *OECD/SETH-2 Project PANDA and MISTRA Experiments. Final Summary Report.* NEA/CSNI/R(2012)5. OECD/NEA.
4. **Martín-Valdepeñas Yagüe, Juan Manuel.** *Modelos numéricos acoplados a un código fluidodinámico para el análisis del riesgo de combustión de hidrógeno en contenciones.* s.l. : Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales -Universidad Politécnica de Madrid.
5. *Interaction of a light gas stratified layer with an air jet coming from below: large scale experiments and scaling issues.* OECD/SETH-2 project. **Studer, E. et al.** 2009.
6. *Synthesis of the OECD/NEA-PSI CFD Benchmark Exercise.* **Andreani, M.** s.l. : CFD4NRS OECD/NEA & IAEA Workshop. Zurich, September 9-11th 2014, 2014.
7. *Gas stratification break-up by a vertical jet: Simulations using the GOTHIC code.* **Andreani, M., Kapulla, R. and Zboray, R.** s.l. : Nuclear Engineering and Design 249, 71-81., 2012.
8. *Dynamics of helium stratifications eroded by vertical air jets with different momenta.* **Kapulla, R, Mignot, G and D, Paladino.** 2013.